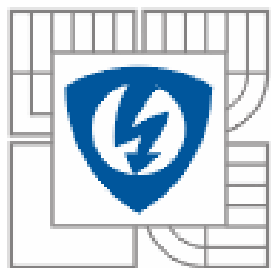




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

3-D CÍVKY A TRANSFORMÁTORY

3-D COILS AND TRANSFORMERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR FLORIÁN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JOSEF ŠANDERA, PH.D.

BRNO 2008

ZADÁNÍ

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Petr Florián

Bytem: Víta nejedlého 39, Vyškov-Dědice

Narozen/a (datum a místo): 24.6.1983, Vyškov

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

Ing. Zdenka Rozsívalová

(dále jen „nabyvatel“)

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Charakterizace technologického procesu

Vedoucí/školicel VŠKP Ing. Josef Šandera, Ph.D.

Ústav: Ústav mikroelektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

☒ tištěné formě – počet exemplářů 1

☒ elektronické formě – počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č.111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Předkládaná práce se zabývá současným stavem řešení 3D cívek a planárních transformátorů s vinutími realizovanými na plošném spoji. Hlavním úkolem je nalézt vhodné technologické postupy výroby plošných spojů a metody jejich vzájemného 3-D propojení. Výstupem práce je výpočet a návrh vinutí planárního transformátoru a výběr vhodné metody pro realizaci. Cílem celé práce je pokusit se navrhnutý transformátor vyrobit.

Abstract:

Construed work deal with present situation in resolving 3D coils and planar transformers with windings realized on printed circuit. Main objective is to find a correct technological process of manufacturing printed circuits and methods of their 3D joining. The output of work is calculation and proposal winding of planar transformer and selection right method for realization. Point of the work is trying to create a suggested transformer

Klíčová slova:

3-D cívky, planární transformátor, vinutí, plošný spoj, 3-D propojení

Keywords:

3-D coils, planar transformer, winding, printed circuit, 3-D connections

Bibliografická citace díla:

FLORIÁN P. *3-D cívky a transformátory-bakalářská práce*. Brno, 2008. 33 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Šandera, Ph.D. FEKT VUT v Brně

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Josefu Šanderovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

1	Zadání a cíle projektu	8
1.1	Zadání	8
1.2	Cíle	8
2	Úvod	9
2.1	Historie vývoje DPS	9
2.2	Funkce DPS	10
2.3	Vývoj různých typů DPS	10
3	Výroba desek plošných spojů.....	12
3.1	Výroba vícevrstvých desek (Multilayer)	12
3.2	Desky s dvouvrstvými základními deskami s pokovenými propojovacími otvory	13
4	Aplikace vícevrstvých DPS na planární technologie	14
4.1	Kondenzátor	14
4.2	Cívka	14
4.3	Transformátor	15
5	Planární transformátory	16
5.1	Druhy planárních transformátorů.....	16
5.1.1	Sestava samotného planárního transformátoru	16
5.1.2	Planární transformátor integrovaný přímo do DPS	17
5.2	Sestavování planárního transformátoru	18
5.2.1	Propojování pájením přes prokovené otvory	18
5.2.2	Spojování vrstev vinutí pomocí pinů (kolíků)	18
5.2.3	Spojování přes hranu	19
6	Návrh planárního transformátoru	21
6.1.	Výpočet maximální magnetické indukce 21	
6.2	Doporučení pro rozdělení závitů v prostoru vinutí	22
6.3	Stanovení zvýšení teploty v DPS způsobené proudy.....	24
6.4	Příklad návrhu	27
7	Závěr	32
8	Seznam použité literatury	33

Zadání a cíle projektu

1.1 Zadání

Seznamte se se současným stavem řešení planárních a 3D cívek a transformátorů. Preferujte řešení vinutí na plošném spoji při použití standardních technologických postupů výroby. Navrhněte vhodné spojení jednotlivých plošných cívek, navrhněte cívku, nebo transformátor a pokuste se realizovat vzorek systému.

1.2 Cíle

Cílem tohoto projektu je teoretické seznámení se s problematikou planárních a 3D cívek a transformátorů. Součástí úkolu je také seznámit se s technologií vícevrstvých plošných spojů z nichž se planární zařízení skládají, především se zaměřením na výrobu vícevrstvých plošných spojů, které jsou vyrobeny spojením jednotlivých oboustranně plátovaných desek.

Výstupem práce by měl být soubor teoretických poznatků o vícevrstvých plošných spojih. Nejprve něco o jejich historii, vývoji různých technologií minulých i současných, používaných materiálech, dále pak o výrobě plošných spojů a metodách jejich spojování do vícevrstvých plošných spojů. Z těchto poznatků provést teoretický návrh planárního transformátoru, jehož vinutí je realizováno na desce plošných spojů a určit vhodnou technologii pro výrobu. Dále pak je nutné vybrat si vhodnou metodu spojení jednotlivých desek plošných spojů, abychom samotný vícevrstvý plošný spoj mohli vyrobit. Tato metoda musí být jednoduchá, účelná a v našich podmínkách realizovatelná.

Praktická část, se bude zabývat výrobou navržených plošných spojů. Ty se pak budou vhodnými technologiemi spojovat k sobě a pak se na nich budou provádět různá měření.

2 Úvod

2.1 Historie vývoje DPS

Vývoj vzájemného spojování elektronických součástek jde v celé historii elektroniky souběžně s jejich modernizací. V začátcích radiotechniky byly vývody součástek řešeny jako připojovací šroubky s maticemi, pod které se přitahoval propojovací drát. To si vyžadovalo značnou rozměrnost součástek. Později se přecházelo na pájecí očka pod šroubky, což brzy vedlo ke drátovým, pájením spojovaným vývodům. Tím se mohly začít zmenšovat rozměry součástek. Vzájemné propojování sice ještě zůstalo drátové, ale již ve třicátých letech se objevují první pokusy o jiné způsoby propojování na pevné podložce. Vznikají první vodivé laky, kterými se na izolační podložce vytvářejí spoje. Začátkem čtyřicátých let se objevují první praktické pokusy realizace amerického patentu z r. 1925 na odleptávání spojů. Výrobní technologie je však drahá, proto vše upadá na několik let v zapomnění.

Teprve vývoj nových materiálů a výrobních postupů umožnil koncem téhož desetiletí techniku odleptávání plošných spojů znovu oživit. V padesátých letech se začíná již úspěšně probíjet na první místo ve spojování elektronických prvků. Vznikají první hybridní obvody, kde již vývody a jejich upevnění nejen na součástce, ale i na desce s plošnými spoji, začíná činit potíže. Koncem šedesátých let přichází firma Philips s prvními součástkami s bezdrátovými vývody. Zahajuje tak novou éru - technologii povrchové montáže součástek, u které již vývody tvoří jen boční stěny součástky, která se pak vpájí na desku ze strany spojů. V počátcích rozvoje desek s plošnými spoji se měděná fólie lepila na tvrzený papír nebo textil, nějaký čas se používal převážně pertinax. Později se s rozvojem umělých pryskyřic pozvolna začalo přecházet na sklolamináty se zalaminovanou měděnou fólií.

Dnes se vyrábí pro různá použití značné množství různých podkladových materiálů, které se od sebe liší hlavně v použití pro kmitočtově závislé obvody, kde významnou roli hraje kapacitní vodivost této podložky. Pro velmi vysoké kmitočty řádu GHz se používají teflonové lamináty (duroid) s příměsemi dále zvyšujícími jakost podložky. U nás se první pokusy s plošnými spoji objevují v roce 1957. Hromadnější výroba se však rozjíždí až na počátku šedesátých let s fólií lepenou na pertinaxové podložce (cuprexcart). Brzy se však přechází na epoxidový laminát (cuprextit). Tyto izolační podložky se vyrábějí od tloušťky asi 0,1 mm pro speciální použití, až po několikamilimetrové, sloužící zároveň jako nosná deska k upevnění těžších součástek (transformátory, tlumivky, relé apod.). Měděné fólie mají tloušťku od 5 μm i více, pro mikromodulové obvody i méně, do 105 μm i více pro obvody s větší proudovou zatížitelností. Při vlastní výrobě spojového obrazce z měděné fólie se nejčastěji používá metoda vykrytí, kdy se

část fólie, která má být na desce zachována, vhodným způsobem zakryje, aby k mědi nepronikla leptací lázeň, do které se celá deska vloží. Po odleptání nepotřebné mědi se deska očistí a případně pokryje pájecím lakem. Přesné vykrytí měděné fólie obrazcem spojů umožňuje vhodná maska.

2.2 Funkce DPS

Deska s plošnými spoji plní tři funkce: poskytuje mechanickou podporu obvodovým součástkám, zprostředkuje potřebné elektrické vodivé spoje a obvykle je opatřena v nějaké formě popisem nebo označením namontovaných součástek. Výhodou desek s plošnými spoji je možnost hromadného pájení spojů, tak totiž dosáhneme stejné kvality spojů jako vodivého obrazce. Moderní pájecí techniky využívající zařízení buď na pájení smáčením nebo vlnou mohou zaručit tisíce spolehlivých spojů za minutu, zatímco kvalita ručně pájených spojů bývá velmi rozdílná a závisí na zručnosti a pečlivosti pracovníka.

2.3 Vývoj různých typů DPS

Běžně používané typy desek

Pojem deska s plošnými spoji může v současné době vyvolat odlišné představy v různých odvětvích elektronického průmyslu. V podstatě se však vždy skládá z vyztužené plastické základny s měděnými plošnými vodiči ve formě tenké fólie. Ojediněle se celý měděný vodivý obrazec vytváří pokovením podkladu, nejčastěji se však vytváří odleptáním z původní celistvé vrstvy na podkladovém materiálu. Vodivý obrazec může být na jedné straně desky nebo na dvou stranách desky a bývá propojen nejrůznějšími způsoby. U vícevrstevných desek může být uvnitř desky několik vodivých obrazců z mědi. Desky jsou opatřeny otvory pro vývody součástek a u dvou a vícevrstevných desek pro spojení jednotlivých vodivých vrstev mezi sebou. Otvory jsou uvnitř pájecích plošek, které mohou mít tvar kruhový, hruškový, oválný, čtvercový nebo jiný dle úvahy projektanta. Pájecí plošky mají mít minimální šířku rovnou dvojnásobku průměru otvoru, který obklopují (pokud nejde o zvlášť velké otvory), přičemž šířka plošných vodičů je srovnatelná s průměrem otvoru.

Vícevrstvé desky

Zavedení metod pokovení propojovacích otvorů jako běžného a životaschopného způsobu elektrického propojování přes základní izolační materiál desky s plošnými spoji prakticky umožnilo rozvoj vícevrstevných desek. Před rozšířením techniky pokovených propojovacích otvorů se používal postup, při němž se vyvrtal velký přístupový otvor z té strany desky, odkud se mělo

provádět pájení, a to všemi vrstvami desky až k pájecí plošce na příslušné vnitřní vrstvě. Velké přístupové otvory spotřebovávaly nadměrně velkou část plochy desky. Tyto desky vyžadovaly při výrobě mimořádnou pečlivost, aby se zamezilo výronu pryskyřice, používané ke slepování jednotlivých základních desek, do prostoru přístupových otvorů, a tím překrytí pájecích plošek na vnitřní základní desce. Třetí nevýhodou je, že v každém otvoru mohla být připojena pouze jedna vrstva základní desky.

3 Výroba desek plošných spojů

Plošné spoje představují dobře vyzkoušenou a ověřenou část výrobku elektronického průmyslu, avšak současný rozvoj mikroelektronických součástek se čtrnácti, šestnácti i více vývody přiměl inženýry zabývat se důkladněji návrhem desek s plošnými spoji, na něž tyto součástky mají být montovány. Vzdálenosti vývodu součástek a nutnost vést mnoho plošných vodičů na omezeném prostoru nutí znovu uvážit minimální rozměry děr, pájecích bodů a plošných vodičů až na hranici dnešní úrovně technologie. Spolehlivá funkce moderních integrovaných obvodů s vysokými operačními kmitočty zároveň vyžaduje minimální délku plošných vodičů, proto je nezbytné soustředit zvýšenou pozornost na návrh plošných spojů a tak docílit optimální délky plošných vodičů. Lineární integrované obvody zpravidla nepotřebují mnoho plošných vodičů k jednotlivým pouzdrům v jednotlivých obvodech a jsou zřídka použity ve velkých počtech, kdežto počet vývodů číslicových součástek se zdá být omezován pouze dostupností vhodných pouzder. V takových aplikacích, jako jsou počítače, systémy zpracovávající radarová data, přepínací zařízení ve spojích, technologické řídicí systémy, se používají číslicové součástky ve velkém počtu (stovky až tisíce) na jedno zařízení nebo přístroj. Stejně základní principy lze aplikovat ovšem také na návrh desek s plošnými spoji pro všechny součástky s více vývody za předpokladu, že jsou respektovány některé další zvláštní požadavky, jako např. přiměřené stínění u vysokofrekvenčních lineárních zesilovačů apod.

3.1 Výroba vícevrstevných desek (Multilayer)

Při použití pokovených propojovacích otvorů lze zhotovit vícevrstvé desky s podstatně menšími otvory (a tedy mnohem těsněji u sebe), než je možné u zmíněných přístupových otvorů. Je také možné propojit libovolný počet základních desek a jejich obrazců u kteréhokoliv propojovacího otvoru. Takové vícevrstvé desky se vyrábějí kombinací výrobních postupů používaných u jednoduchých desek a u desek s pokovenými propojovacími otvory. Jednotlivé základní desky, jednovrstvé nebo dvouvrstvé, se leptají stejným způsobem jako jednoduché desky (po vyseknutí nebo vyvrtání lícovacích otvorů) a potom se slepí pomocí lepicích listů. Jsou to obvykle fólie skelné tkaniny impregnované podobnou pryskyřicí, která se používá u normálních desek, ale která není plně vytvrzena. Tyto lepicí listy se vloží mezi základní desky s leptanými obrazci srovnané pomocí lícovacích čepů a celá sestava se vloží do velkého a výkonného lisu. Lisovací desky musí být vyhřívány. Na počátku cyklu se nastaví mírný tlak, kterým se docílí těsný styk základních desek a etáže se zahřejí. Tím se zmenší viskozita pryskyřice v prostoru mezi základními deskami do té míry, že se stane tekutou. Potom, když pryskyřice vytlačí všechny vzduchové bubliny z prostoru mezi základními deskami, nastaví se

plný tlak nutný pro slepení základních desek a pryskyřice se zvýšenou teplotou vytvrdí. Další výrobní postup je stejný jako u dvouvrstvé desky s pokovenými propojovacími otvory s tím rozdílem, že po vyvrtání otvoru se vícevrstvá deska ponoří do koncentrované kyseliny sírové nenapadající měď a odstraní se vyvřeliny pryskyřice z okrajů měděných vrstev, které vzniknou při vrtání otvorů. Směs koncentrované kyseliny sírové a fluorovodíkové se může použít k odleptání základního izolačního materiálu v otvorech mezi měděnými vrstvami, a tím se zvětší kontaktní plocha mezi pokovením propojovacího otvoru a jednotlivými vrstvami. Po tomto odleptání postupuje pokovování propojovacích otvorů a leptání mědi obvyklým způsobem.

3.2 Desky s dvouvrstvámi základními deskami s pokovenými propojovacími otvory

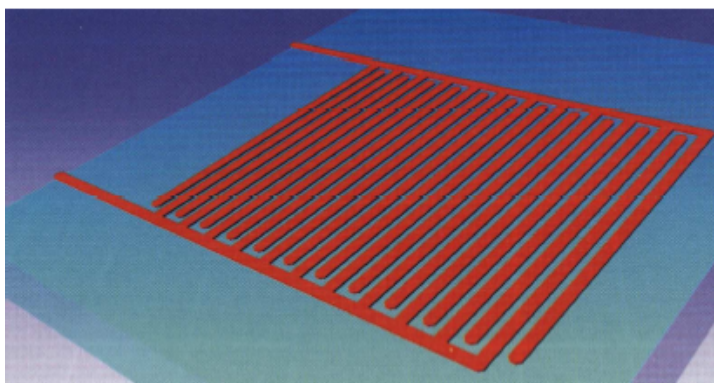
Někdy je nezbytné, aby plošný vodič byl propojen s druhou vrstvou, a tím se umožnilo jeho křížení s jinými plošnými vodiči na původní vrstvě. U vícevrstevných desek, vyrobených popsáním způsobem, by takový přechod z jedné vrstvy na druhou vyžadoval otvor procházející všemi základními deskami. To znamená, že žádný jiný plošný vodič v kterékoli jiné vrstvě by nemohl procházet v prostoru propojovacího otvoru, neboť by došlo ke spojení s plošným vodičem přecházejícím z jedné vrstvy na druhou. U desek s velmi těsným rozmístěním součástek a obrazců by to způsobilo značné ztráty užité plochy. Vícevrstvé desky lze také vyrobit z dvouvrstevných základních desek s vyvrtanými a prokovenými propojovacími otvory pro přechod z jedné vrstvy na druhou. Vzhledem k tomu, že jednotlivé základní desky u vícevrstevných desek jsou mnohem tenčí než dvouvrstvé desky srovnatelných rozměrů, mohou být rozměry propojovacích plošek a otvorů sloužících k propojování jednotlivých vrstev menší než pájecí plošky a propojovací nebo součástkové otvory vrtané po slepení základních vrstev. To představuje další úsporu užité plochy desky.

4 Aplikace vícevrstvých DPS na planární technologii

Existuje mnoho použití planární technologie, kdy tato poskytuje zvýšený výkon a cenný přínos při sestavování pomůcek pomocí běžné technologie.

4.1 Kondenzátor

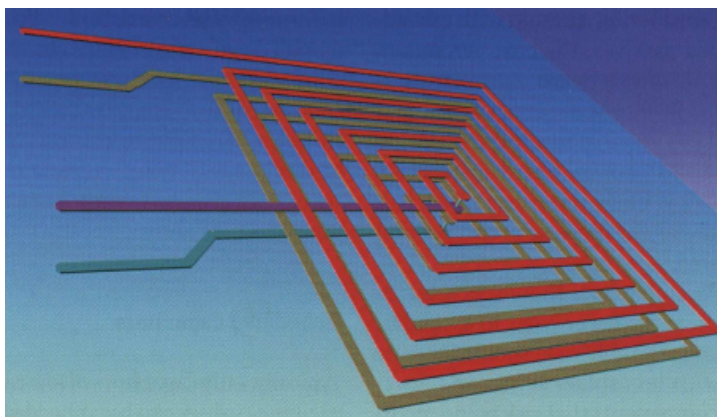
Tento planární kondenzátor je vytvořen jako hřebenový. Jsou to dvě elektrody, které jsou na plošném spoji vytvořeny jako dva hřebeny zasunuté do sebe. Výsledná kapacita je dána plochou elektrod a také permitivitou použitého materiálu DPS.



Obr. 1: Planární struktura kondenzátoru [1]

4.2 Cívka

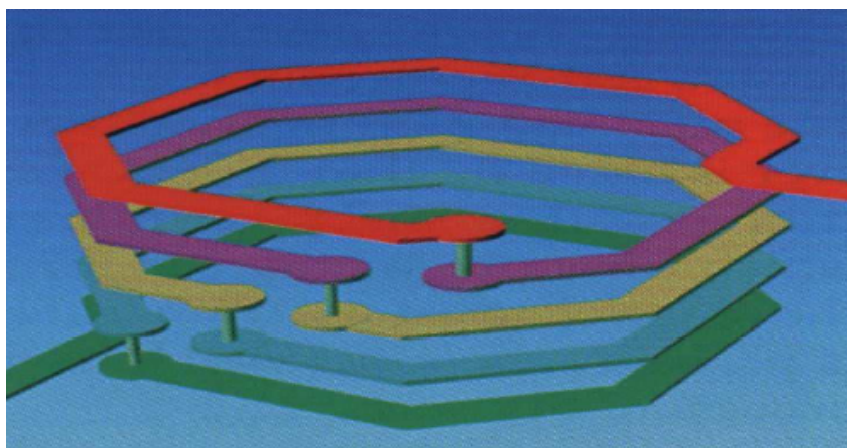
Na tomto obrázku jsou vytvořeny dvě cívky ve vícevrstvě plošném spoji v různých vrstvách. Indukčnost cívek je dána průřezem vodiče, permeabilitou materiálu, z něhož je deska vyrobena a také počtem závitů.



Obr. 2: Planární struktura cívky [1]

4.3 Transformátor

Na tomto obrázku je návrh planárního transformátoru. Jednotlivá vinutí jsou rozložena do pěti vrstev. Jednotlivé závity jsou propojeny prokovenými otvory. Návrh pro jednoduchost ukazuje pouze jednu část vinutí transformátoru (sekundární). Druhé vinutí (primární) bývá uspořádáno podobně. Jeho závity jsou také v těchto vrstvách, ale jednotlivá vinutí jsou vzájemně galvanicky oddělena. Magnetický tok se uzavírá přes feritové jádro. Vlastnosti transformátoru závisí na počtu závitů jednotlivých vinutí, na průřezu vodivých vrstev a na vlastnostech feritového jádra.



Obr. 3: Planární struktura transformátoru [1]

5 Planární transformátory

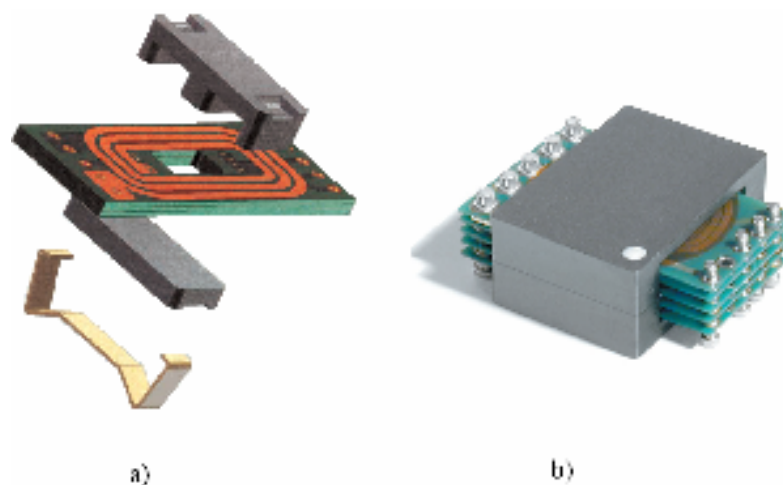
Návrh planárního transformátoru je výhodný hlavně v případech, kdy je nutný vyšší proud, vyšší frekvence, vysoká opakovatelnost (tzn., že podle jedné šablony se dá dělat velké množství dalších kusů), nebo speciální vlastnosti jako je nízká rozptylová indukčnost nebo indukční vinutí a vysoký počet terminálů. Velmi důležitý je také vysoký výkon spojený s dobrými chladicími vlastnostmi. Požadavek vyšší účinnosti a výkonu zdroje u elektronických zařízení vedl v posledních letech k účinnější topologii konvertoru. To zahrnuje samozřejmě potřebu velmi složitěho transformátoru, kde jsou nutná různá vinutí a požadavky na izolaci dosahující až 600 V (kvůli napětí sběrnice propojovacího vedení stejnosměrného proudu). Vodičové připojení transformátoru by si vyžádalo rozměrnou a složitou konstrukci. Nedávno bylo schváleno mnoho návrhů planárních transformátorů, které používají pevnou izolaci provedenou pomocí desky plošných spojů. Planární transformátory mají plošná vinutí zapouzdřena ve vícevrstvých deskách plošných spojů (DPS), uložených mezi feritovými jádry s nízkým profilem. V planárním návrhu existuje mnohem lepší možnost, jak získat velký počet vinutí v libovolném uspořádání vedení výstupů. Tato vinutí mohou být prokládána tak, aby redukovala rozptylovou indukci a umožnila provést operaci v rozsahu vysokých frekvencí. Je-li to nutné, lze zde také dosáhnout vysoké úrovně izolace mezi vinutími transformátoru. Bezjádrový planární transformátor zde představuje speciální případ. Když vinutí jsou umístěna dosti blízko jádra, může být ušetřena práce v rozsahu vysokých frekvencí. Kvůli návrhu a velikosti vinutí může být kapacitní vazba redukována tak, aby neovlivňovala celkovou kapacitu dosaženou mezi vstupem a výstupem.

Měření na planárních E jádrech transformátorů v provozních podmínkách s vinutími ve vícevrstvých deskách plošných spojů ukazuje, že teplotní odpor je podstatně nižší (až 50 %), ve srovnání s konvenčními transformátory vinutými drátem se stejným efektivním objemem jádra V_e (effective core volume). To je způsobeno zlepšeným povrchem vzhledem k objemovému koeficientu. Výsledkem této lepší chladicí schopnosti je to, že planární transformátory mohou pracovat s vyšší hodnotou výkonnosti, zatím co zvýšení teploty je ještě v mezích normy.

5.1 Druhy planárních transformátorů

5.1.1 Sestava samotného planárního transformátoru

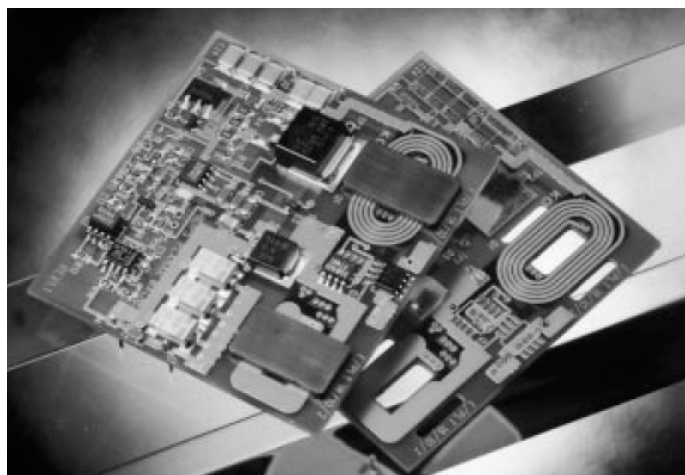
Zde je ukázka planárních transformátorů s feritovým jádrem. Jsou složeny z oboustranně plátovaných desek plošných spojů, na kterých jsou vytvořena vinutí. Jednotlivé desky jsou spojeny v jednom případě pomocí prokovených otvorů a ve druhém pomocí pinů (kolíků).



Obr. 4: Planární transformátory: a) spojení přes prokovené otvory, b) spojení pomocí pinů [2], [3]

5.1.2 Planární transformátor integrovaný přímo do DPS

Zde je ukázka planárního transformátoru, integrovaného do vícevrstvé desky plošných spojů s vnitřní strukturou. Do desky jsou udělány otvory pro vložení jádra. Tato varianta transformátoru se používá v aplikacích, kde není mnoho místa, nebo tam, kde je potřeba mít na jedné desce celé zařízení včetně zdroje.



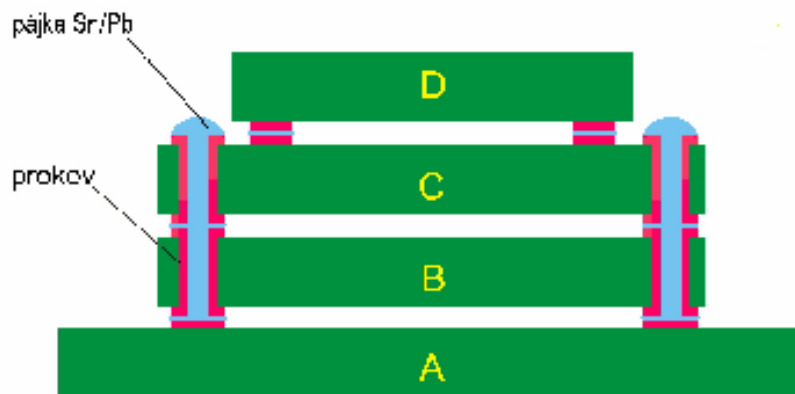
Obr. 5: Planární transformátor integrovaný přímo do desky plošných spojů [4]

5.2 Sestavování planárního transformátoru

Zde jsou uvedeny tři základní metody propojování jednotlivých oboustranných desek plošných spojů s vinutími. Jedná se o propojování pomocí prokovených otvorů, propojování pomocí pinů a propojování přes hranu desky plošného spoje.

5.2.1 Propojování pájením přes prokovené otvory

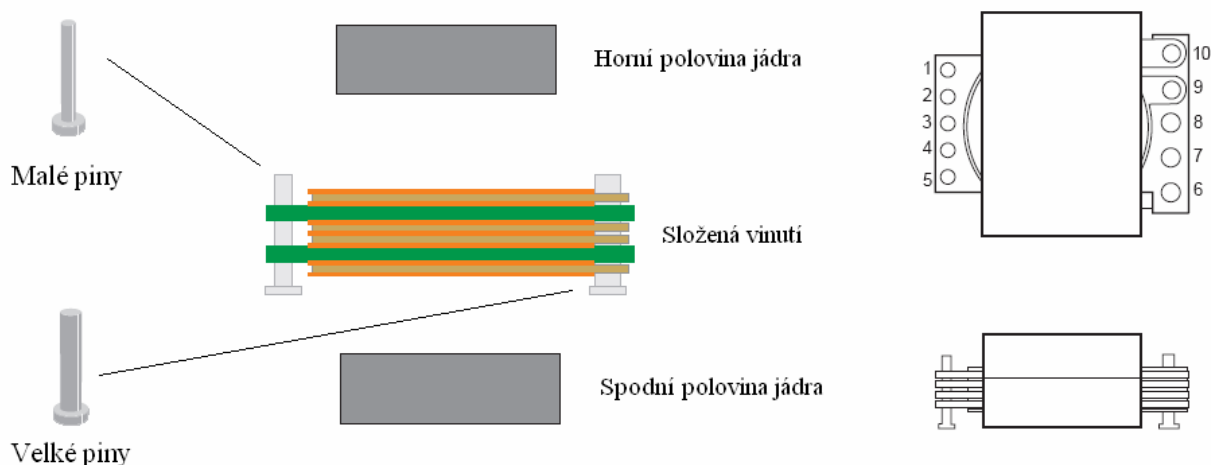
Jedná se o metodu prokovených otvorů, které se propojí pájením. To se realizuje pomocí pájky. V dnešních technologiích se vzhledem k životnímu prostředí používají hlavně bezolovnaté pájky. Může se použít pájecí pasta, nebo kuličky (jsou to kuličky vyrobené z pájky o různých průměrech dle potřeby). Oba dva typy pájky se pájí přetavením v horkovzdušné peci. Roztavená pájka v prokovených otvorech vztlíná po stěnách. Tím se desky spájí dohromady. Tato metoda se dá realizovat i ručně pomocí hrotové pájky. Do prokovených otvorů se nanese pájecí pasta. Po přiložení pájecího hrotu se pájka roztaví a zapájí prokovený otvor stejně jako v horkovzdušné peci.



Obr. 6: Propojení jednotlivých desek přes prokovené otvory [5]

5.2.2 Spojování vrstev vinutí pomocí pinů (kolíků)

U této metody se propojování jednotlivých vrstev realizuje pomocí propojovacích kolíků (pinů). Oboustranné desky plošných spojů s vinutími mají prokovené otvory, které se nasouvají na kolíky. Průměry kolíků se pro primární a sekundární stranu liší. Na primární straně mají menší průměr, protože je zde nižší proud a také proto, aby se desky nedaly nevhodně otočit. Potřebné mezery mezi jednotlivými deskami zajišťují izolační podložky. Po nasunutí všech desek na kolíky se prokovené otvory desek plošných spojů spájí s vodivými kolíky a tím je zajištěno propojení jednotlivých vinutí.



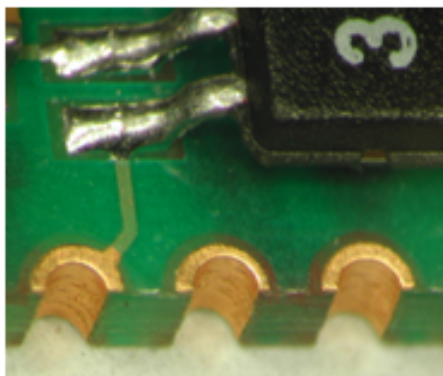
Obr. 7: Planární transformátor spojený pomocí propojovacích kolíků (pinů) [4]

5.2.3 Spojování přes hranu



Obr. 8: Propojení kontaktováním přes hranu [5]

Spojování přes hranu plošného spoje je další možností, jak vodivě propojit plošné spoje. Při návrhu se prokovené otvory umístí k okraji desky. Deska se klasicky vyrobí a propojovací otvory se pokoví. Pak se plošný spoj upraví podobně, jako je uvedeno na obrázku (tento obrázek je pouze pro ukázkou), tzn., že okraje desky se odfrézují tak, aby zůstaly poloviny prokovených otvorů, jak je uvedeno na detailu plošného spoje. Před frézováním se mohou otvory zalít pájkou, aby se okraje otvoru neotřepily.



Obr. 9: Detail odfrézované hrany [5]

Jednotlivé desky se pak spojují tak, že se dají na sebe, aby ofrézované prokovené otvory lícovali na sebe. Prokovené otvory se pak zalijí pájkou (bezolovnatou) a tím se jednotlivé desky vodivě propojí.

6 Návrh planárního transformátoru

6.1. Výpočet maximální magnetické indukce

Jádro a ztráty mědi transformátoru v provozu budou způsobovat zvýšení teploty. Tento vzestup musí zůstat pod maximální dovolenou hodnotou, aby se zabránilo poškození transformátoru nebo zbývající části systému. Teplotní vyváženost celkových ztrát v transformátoru P_{trafo} může být spojena s oteplením transformátoru obdobou Ohmova zákona:

$$P_{trafo} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (1)$$

V tomto vzorci R_{th} reprezentuje teplotní odpor transformátoru. P_{trafo} může ve skutečnosti být interpretována jako chladicí schopnost transformátoru. Předchozí vztah ukázal, že je možné zavést empirický vztah, kde souvisí hodnota teplotního odporu transformátoru přímo s hodnotou efektivní magnetické kapacity V_e použitého feritového jádra. Tento empirický vztah je platný pro drátově navinuté transformátory s jádrem tvaru RM a ETD. Podobný vztah má být nalezen pro planární E transformátory. Tento vztah může být použit k odhadu oteplení transformátoru jako funkce magnetické indukce v jádru. V důsledku omezení vhodného prostoru na vinutí je doporučeno, použít maximální magnetickou indukci v planární magnetizaci (magnetics).

Za předpokladu, že polovina celkových ztrát transformátoru jsou ztráty jádra, je možné použít maximální hustotu ztrát v jádře $P_{jádra}$ jako funkci oteplení ΔT transformátoru jako:

$$P_{JÁDRA} = \frac{12 \cdot \Delta T}{\sqrt{V_e (cm^3)}} \quad [mW / cm^3] \quad (2)$$

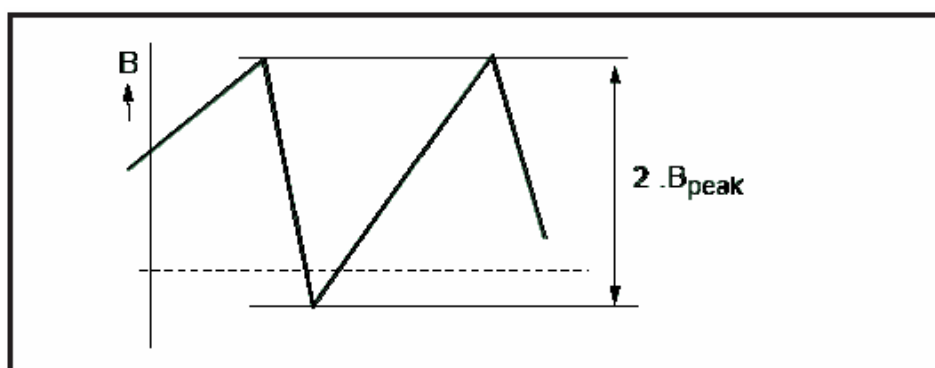
Ztráty ve feritu byly měřeny jako funkce frekvence [f, Hz], vrchol magnetické indukce [B, T] a teploty [T, °C]. Hustota ztrát v jádře může být aproximována tímto vztahem:

$$\begin{aligned} P_{JÁDRA} &= C_m \cdot f^x \cdot B_{špičpi}^y \cdot (ct_0 - ct_1 T + ct_2 T^2) \quad (3) \\ &= C_m \cdot C_T \cdot f^x \cdot B_{špičpi}^y \quad [mW / cm^3] \end{aligned}$$

V tomto vzorci C_m , x , y , ct_0 a ct_2 jsou parametry, které byly nalezeny aproximací přímky změřených výkonových ztrát. Tyto parametry jsou specifické pro feritové materiály. Jsou rozměrové takovým způsobem, že 100°C hodnota C_T je rovna 1. V tabulce 1 jsou uvedeny

vhodné parametry výkonů feritů. Dovolené maximum $P_{\text{jádra}}$ je počítáno z rovnice (2). Tato hodnota je vložena z rovnice (3). Dovolené maximum magnetické indukce B_{peak} může být tedy spočítáno s přepisem rovnice (3):

$$B_{\text{peak}} = \left[\frac{P_{\text{JÁDRA}}}{C_m \cdot C_T \cdot f^x} \right] [T] \quad (4)$$



Obr. 10: Graf B_{peak}

Tab. 1: Vhodné parametry pro výpočet rozptylové indukce

ferrite	f (kHz)	Cm	x	y	ct0	ct1	ct2
3C30	20-100	$6.48 \cdot 10^{-3}$	1.42	3.02	$3.65 \cdot 10^{-4}$	$6.65 \cdot 10^{-2}$	4
	100-200	$6.48 \cdot 10^{-3}$	1.42	3.02	$4 \cdot 10^{-4}$	$6.8 \cdot 10^{-2}$	3.8
3C85	20-100	$11 \cdot 10^{-3}$	1.3	2.5	$0.91 \cdot 10^{-4}$	$1.88 \cdot 10^{-2}$	1.97
	100-200	$1.5 \cdot 10^{-3}$	1.5	2.6	$0.91 \cdot 10^{-4}$	$1.88 \cdot 10^{-2}$	1.97
3C90	20-200	$2.65 \cdot 10^{-3}$	1.45	2.75	$1.65 \cdot 10^{-4}$	$3.1 \cdot 10^{-2}$	2.45
3F3	20-300	$0.25 \cdot 10^{-3}$	1.6	2.5	$0.79 \cdot 10^{-4}$	$1.05 \cdot 10^{-2}$	1.26
	300-500	$2 \cdot 10^{-5}$	1.8	2.5	$0.77 \cdot 10^{-4}$	$1.05 \cdot 10^{-2}$	1.28
	500-1000	$3.6 \cdot 10^{-9}$	2.4	2.25	$0.67 \cdot 10^{-4}$	$0.81 \cdot 10^{-2}$	1.14
3F4	500-1000	$0.12 \cdot 10^{-3}$	1.75	2.9	$0.95 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	1.15
	1000-3000	$1.1 \cdot 10^{-11}$	2.8	2.4	$0.34 \cdot 10^{-4}$	$0.01 \cdot 10^{-2}$	0.67

6.2 Doporučení pro rozdělení závitů v prostoru vinutí

Hodnota maximální špičky magnetické indukce je určena, stanovený vzorec vhodný pro měničovou topologii a transformátorové modely (např. flyback a forward) může být použit pro výpočet počtu primárních a sekundárních závitů.

Rozhodnutí musí být provedeno tak, že vinutí budou rozdělena vhodně přes jednotlivé vrstvy. Proudů v drahách budou způsobovat oteplení DPS. Je doporučeno rozmístit závitů vinutí

ve vnějších vrstvách souměrně s ohledem k vinutí vnitřních vrstev z důvodů tepelného roztažení. Z pohledu magnetického bodu by bylo optimální proložení primárních a sekundárních vrstev. To bude redukovat takzvaný distanční efekt. Nicméně vhodná úroveň vinutí v DPS a požadovaný počet závitů nebude poskytovat pro použití optimální návrh.

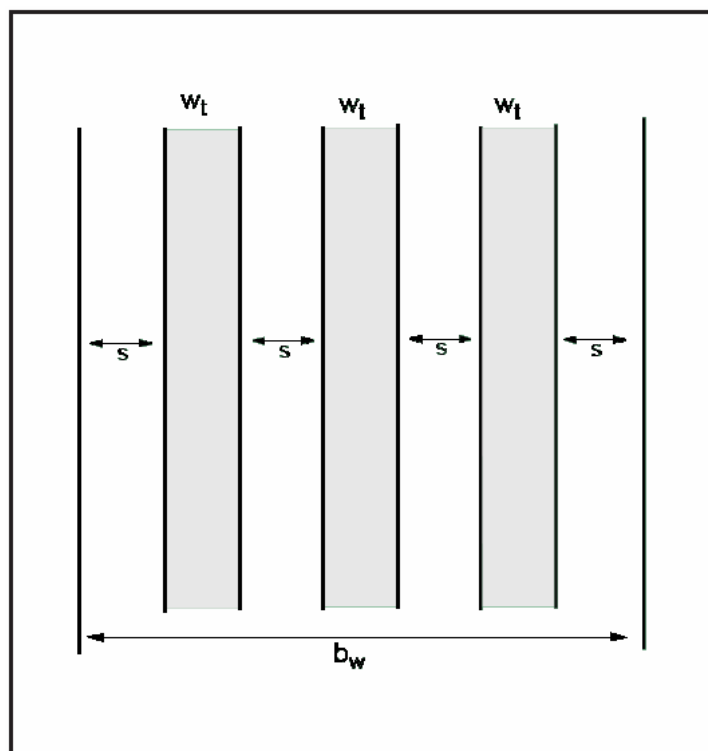
Z důvodů nákupní ceny je doporučeno volit standardní tloušťku měděných vrstev. Často jsou výrobci DPS používány tloušťky 35 nebo 70 μm . Volba tloušťky vrstev hraje důležitou roli pro oteplení, vyvolané indukovanými proudy. Bezpečnostní normy jako IEC 950 vyžadují mezeru 400 μm pro DPS materiály (FR2 nebo FR4) pro izolovanost vedení mezi primárním a sekundárním vinutím. Jestliže izolovanost vedení není požadována, mezera 200 μm mezi vinutími jednotlivých vrstev je dostačující. Mimo to, každý musí vzít do úvahy vrstvu pájecí masky okolo 50 μm nahoře a dole DPS.

Šířka cesty vinutí vyplývá z hodnoty proudu a z maximální dovolené hustoty proudu. Mezera mezi vinutími je řízena výrobní schopností a cenovým hrubým odhadem pro tloušťku měděné vrstvy. Pro vrstvy s šířkou cesty 35 μm je mezera větší jak 150 μm a pro vrstvy 70 μm je větší jak 200 μm . V závislosti na výrobní kapacitě výrobců by mohly být menší rozměry přijatelné, ale to bude pravděpodobně znamenat značný nárůst ceny DPS. Počet závitů na vrstvě a mezery mezi závity jsou označeny samostatně symboly N_1 a s . Pak pro vhodnou šířku závitu b_w může být šířka cesty w_z spočítána přes:

$$w_t = \frac{[b_w - (N_1 + 1) \cdot s]}{N_1} \quad [mm] \quad (5)$$

V případě, že požadavky na izolaci musí být splněny, situace je trochu jiná. Jádrem je viděno jako část primární strany a musí být odděleno 400 μm od sekundární strany. Tudíž plošná vzdálenost mezi (sekundárními) závity blízko u vnitřní a vnější spojky a jádrem musí být 400 μm . V tomto případě může být šířka cesty vypočítána z (6). Potom 800 μm musí být odečteno od dostupné šířky závitu:

$$w_t = \frac{[b_w - 0,8 - (N_1 - 1) \cdot s]}{N_1} \quad [mm] \quad (6)$$



Obr. 11: Šířka cesty w_t , mezera s a šířka vinutí b_w

6.3 Stanovení zvýšení teploty v DPS způsobené proudy.

Posledním krokem je stanovení zvýšení teploty v měděných cestách indukované proudem. K tomuto účelu musí být efektivní (RMS) proudy vypočítány ze vstupních údajů a požadovaného výkonu. Výpočtová metoda závisí na topologii využití. Například ve výrobě je to ukázáno na tradičních normách pokroku a cestě zpět u transformátorových topologií. Například vztahy mezi efektivními proudy a oteplením pro různé průřezy vedení v plošných spojích jsou ukázány v charakteristice na obrázku 15. Pro jednovodičové aplikace nebo cívky, které nejsou příliš těsně rozloženy, může být tento graf přímo použit pro určení vodiče vinutí, sílu vodiče, plochu příčného řezu a dovolené maximum proudů pro různé pevně nastavené hodnoty oteplení.¹

Nedostatkem v tomto návrhovém přístupu je to, že indukované teplo ve vinutí je způsobeno vypočítaným stejnosměrným proudem, zatím co v realitě budou střídavé proudy vytvářet

¹ Pro skupiny podobných paralelních induktorů, jestliže jsou blízko rozloženy, oteplení může být nalezeno s použitím ekvivalentního příčného řezu a ekvivalentními proudy. Ekvivalentní příčný řez je součtem příčných řezů paralelních vodičů a ekvivalentní proud je součtem proudů v cívce.

povrchový jev (skin efekt) a vzájemný jev. Povrchový jev je způsoben vnitřním magnetickým polem vodiče vytvořeným ve vodiči vlastním proudem. Rychle měnící se proudy (VF frekvence) indukují střídavé toky, které vyvolají vířivé proudy. Tyto vířivé proudy, které se připojí k hlavnímu proudu, jsou k tomuto proudu opačné. Proud je úplně zrušen ve středu vodiče a pohybuje se směrem k povrchu. Proudová hustota klesá exponenciálně z povrchu směrem ke středu.

Hloubka proniknutí δ je vzdálenost od povrchu vodiče směrem ke středu, kde proudová hustota klesá o složku $1/e$. Hloubka proniknutí závisí na vlastnostech materiálu, jako je vodivost a permeabilita (propustnost) a je nepřímo úměrná druhé mocnině frekvence. Pro měď o 60°C může být aproximována přes:

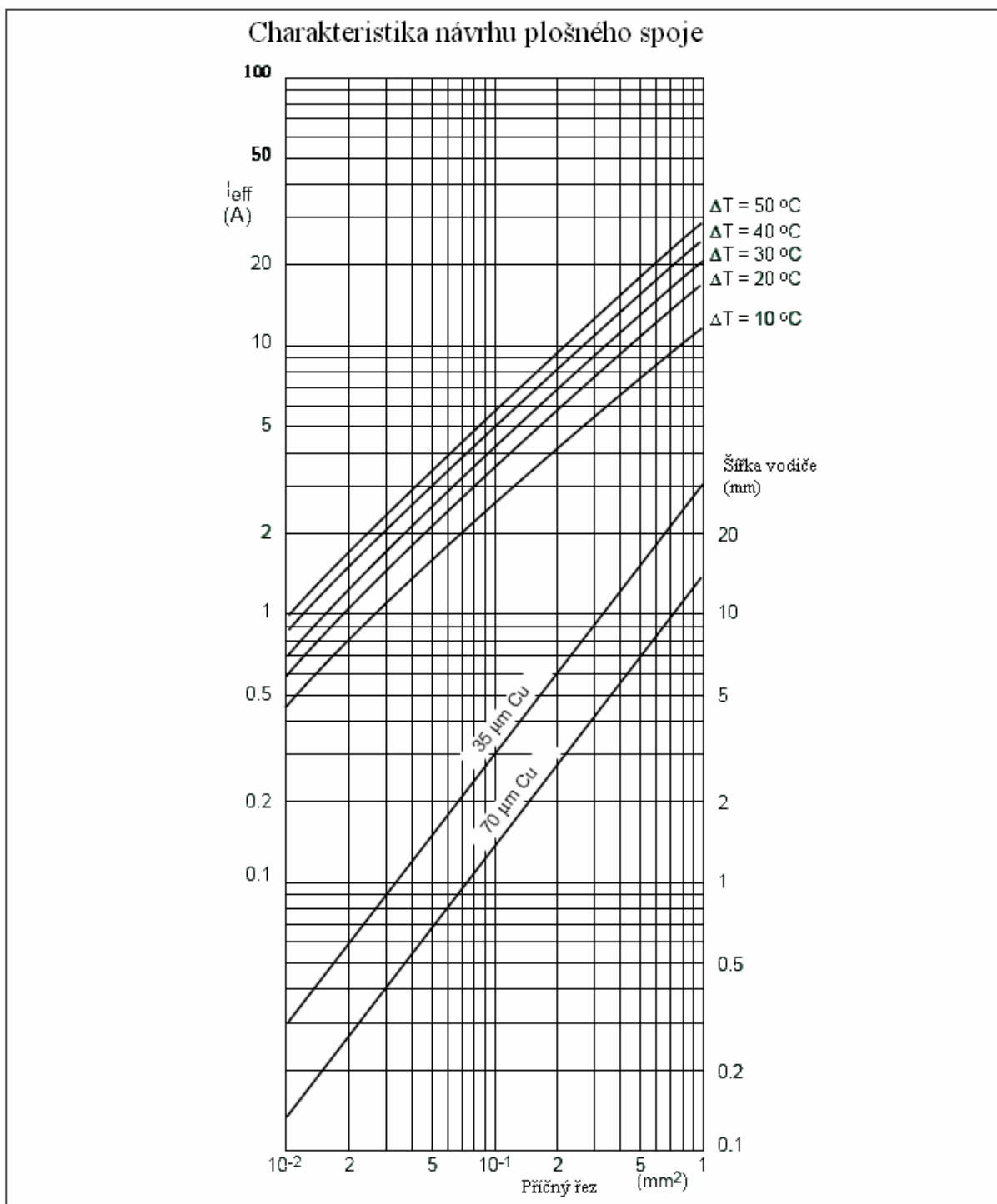
$$\delta(\mu\text{m}) = \frac{2230}{(f[\text{kHz}])^{1/2}}$$

Když vodič šířky w_t vezme méně než 2δ , příspěvek tohoto efektu bude omezen. To znamená šířku cesty od $200\ \mu\text{m}$ pro frekvenci od $500\ \text{kHz}$. Jestliže je tam více vinutí šířky b_w , vhodné pro příslušný počet závitů, nejlepším řešením z magnetického hlediska by bylo, rozdělit je nahoru do paralelních cest.

V reálných situacích budou způsobeny proudové účinky ve vodičích nejen kvůli střídavým polím (skin effect-povrchový jev), ale také kvůli polím dalších vodičů v okolí. Efekt se nazývá blízkostní efekt. Když primární a sekundární vrstvy jsou prokládány, tento efekt bude silně snížen. Důvodem je, že primární a sekundární toky proudů mají opačný směr a jejich magnetická pole se budou rušit. Ať tak, nebo tak, bude toto přispívat k blízkostnímu efektu blízkých vodičů ve stejné vrstvě.

Empirický nástroj

Měření teploty na několika návrzích vícevrstvých desek se střídavými proudy, dodávanými do vinutí, ukazuje opodstatněnou správnost věci, že každé zvýšení frekvence o $100\ \text{kHz}$ až do $1\ \text{MHz}$ dává navíc 2°C oteplení DPS ve srovnání s hodnotami určenými pro stejnosměrné proudy.



Obr. 12: Závislost mezi proudem, rozměry cesty na DPS a oteplením

6.4 Příklad návrhu

Tab. 2: Provozní hodnoty transformátoru

Vstupní a výstupní napětí	48V	5V
	48V	3,3V
	24V	5V
	24V	3,3V
Výstupní výkon	P_{\max}	18W
Činitel využití	δ	0,46
Četnost zapínání	f	500kHz
Teplota okolí	$T_{\text{okolí}}$	40°C
Dovolené oteplení	ΔT	50°C

Je zde úkol navrhnout planární transformátor, s možností zvolit ze čtyř transformačních poměrů, které jsou často používány v nízko výkonových DC-DC měničích. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.

Prvním krokem je kontrola, zda nejmenší kombinace jádra standardní řady planárního E jádra, E-PLT a E-E14, jsou vhodné pro aplikaci. Použití vzorce (2) k výpočtu dovolené ztráty hustoty jádra pro oteplení o 50°C má za následek 1 095 mW/cm³ pro E-PLT14. Ze vzorce (3) je výpočet hustoty ztrát jádra pro jednocestný trojúhelníkový tvar signálu s frekvencí 500 kHz a různými špičkami hustoty toku. To ukazuje, že špička hustoty toku okolo 100 mT, bude mít za následek ztráty nižší než dovolené ztráty hustoty toku jádra, počítané ze vzorce (2). Výpočet závitů a efektivních proudů je učiněn podle vzorců:

$$N_1 = \frac{U_{i\min} \cdot \delta}{2 \cdot f \cdot B_{\text{špičpi}} \cdot A_e}$$

$$N_2 = \frac{N_1 \cdot U_0}{U_{i\min} \cdot \delta}$$

$$L_{\text{PRIM}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_a \cdot N_1^2 \cdot A_e}{I_e}$$

$$I_{\text{mag}} = \frac{U_{i\min} \cdot \delta}{f \cdot L_{\text{PRIM}}}$$

$$I_{p(RMS)} = \frac{I_{0(RMS)}}{r} \cdot \frac{I_{\text{mag}}}{2} \sqrt{\delta}$$

Použití špičkové hustoty toku 100 mT, společně se vstupními jmenovitými hodnotami pro výpočet ukazuje, že pro frekvenci 530 kHz jsou použitelné kombinace jader E-E14 nebo E-PLT14, s přiměřeným počtem závitů. Výsledky výpočtů jsou v tabulce 3.

Tab. 3: Výpočty několika druhů transformátorových jader

Jádru	V _{in}	V _{out}	N ₁	N ₂	L _{prim} (μH)	I _o (RMS) (mA)	I _{mag} (mA)	I _p (RMS) (mA)
E-PLT14	48V	5V	14	3.2	690	2441	60	543
	48V	3.3V	14	2.1	690	3699	60	548
	24V	5V	7	3.2	172	2441	121	1087
	24V	3.3V	7	2.1	172	3699	121	1097
E-E14	48V	5V	14	3.2	855	2441	48	539
	48V	3.3V	14	2.1	855	3699	48	544
	24V	5V	7	3.2	172	2441	97	1079
	24V	3.3V	7	2.1	172	3699	97	1089

Výsledná kontrola ztrát hustoty jádra na provozní teplotě 100°C pro použitý tvar vlny magnetické indukce na 530 kHz dává pro 3F3 1 030 mW/cm³ a pro 3F4 1 580 mW/cm³. 3F3 je jasně nejlepší možnost.

Indukované oteplení je dáno: (vypočítané ztráty/dovolené ztráty)·1/2 přípustného oteplení

$$\text{Indukované oteplení} = \frac{1030}{1225} \cdot 25^{\circ}\text{C} = 21^{\circ}\text{C}$$

Pro E-E14 by to bylo 23,5°C.

Pro primární stranu je požadováno 7 nebo 14 závitů, v závislosti na vstupním napětí. Pro tradiční transformátory jsou stejné hodnoty závitů nutny pro demagnetizaci (zotavení) vinutí. Použít 7 nebo 14 primárních závitů tak, aby stejný počet závitů demagnetizoval vinutí, jsou vybrány 4 vrstvy po 7 závitech, když 7 primárních a demagnetizačních závitů je na dvou vrstvách kontaktováno paralelně. Toto bude způsobovat další efekt, že proudová hustota v cestách vinutí bude rozpůlena.

Protože 14 závitů je nezbytných pro primární a demagnetizační vinutí, závity ve dvou vrstvách jsou sériově spojeny tak, že efektivní hodnota vinutí je 14. Dovolená šířka vinutí pro DPS pro jádro E14 je 3,65 mm. Šířka cesty pro 300μm mezeru pro 7 závitů na vrstvu je 178 μm. Tloušťka měděné vrstvy by měla být 70 μm, protože pro vstupní napětí 24 V je efektivní primární proud 1,09 A. Toto dává (podle charakteristiky na obr 12) při efektivní šířce cesty 356 μm (dvojnásobek, protože paralelní spojení 7 závitů na vinutí) oteplení 15°C. Vstupní napětí

48 V bude mít za následek efektivní proud okolo 0,54 A. Šířka cesty 178 μm (14 závitů vinutí spojených sériově) a její ztráty vinutí přispívají k oteplení přibližně 14°C.

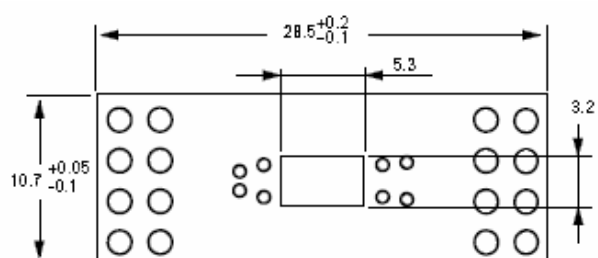
Šířka cesty 178 μm s mezerou 300 μm pro 70 μm tloušťku mědi se odchyluje od hrubého odhadu (mezera a šířka cesty větší jak 250 μm). Tato síla způsobí vyšší výrobní cenu pro vícevrstvé DPS.

Sekundární vinutí potřebuje 2 nebo 3 závity. Když jsou tyto závity pouze na jedné vrstvě, tak z toho plyne šířka cesty 810 μm respektive 1 370 μm . Sekundární indukované efektivní proudy 2,44 a 3,7 A indukují oteplení okolo 25°C ve vinutí, které je přidáno k oteplení primárního vinutí, je příliš velké. V tomto případě je nejlepším řešením použít dvě vrstvy pro obě vinutí. Když tato vinutí, každé se třemi závity, jsou spojeny paralelně proudová hustota je rozpuřena.

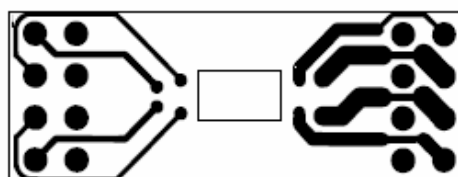
Z charakteristiky na obrázku 12 může být odvozeno, že ztráty vinutí přispívají k oteplení, v tomto případě bude okolo 6°C. Celkové oteplení DPS bude přibližně 21°C, plus přírůstek způsobený střídavými ztrátami. Od frekvence 500 kHz to bude o 10°C více, teplota naroste na 31°C.

Tab. 4: Struktura vrstev

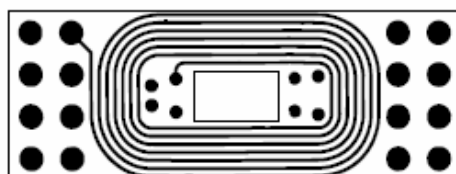
Vrstvy	Závity	70 μm
Pájecí maska		50 μm
Propojovací vrstva		70 μm
Vzduchová mezera		200 μm
Primární demag. vinutí	7	70 μm
Vzduchová mezera		200 μm
Primární vinutí	7	70 μm
Vzduchová mezera		200 μm
Sekundární vinutí	3	70 μm
Vzduchová mezera		200 μm
Sekundární vinutí	2	70 μm
Vzduchová mezera		200 μm
Sekundární vinutí	2	70 μm
Vzduchová mezera		200 μm
Sekundární vinutí	3	70 μm
Vzduchová mezera		200 μm
Primární vinutí	7	70 μm
Vzduchová mezera		200 μm
Primární demag. vinutí	7	70 μm
Vzduchová mezera		200 μm
Propojovací vrstva		70 μm
Pájecí maska		50 μm
Celkově		2600 μm



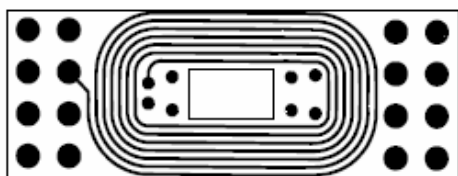
Propojovací vrstva



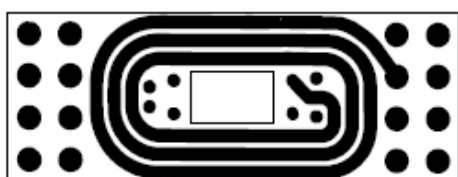
Vrstva 1 (top)



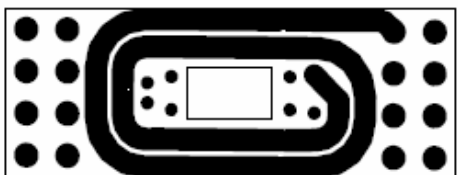
Vrstva 2



Vrstva 3



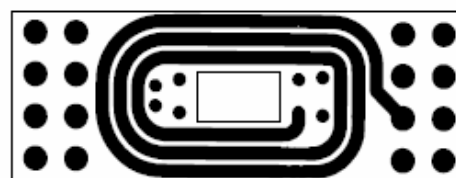
Vrstva 4



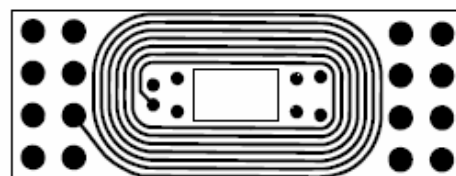
Vrstva 5



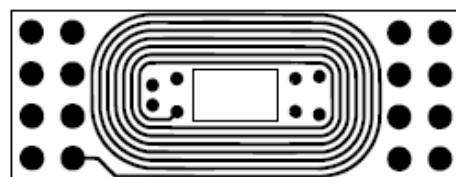
Vrstva 6



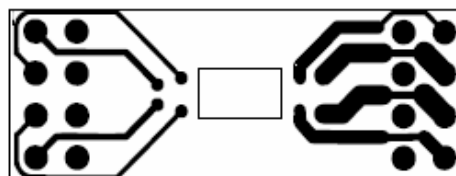
Vrstva 7



Vrstva 8



Vrstva 9



Vrstva 10 (bottom)

Obr. 13: Navržené vrstvy transformátoru

Kompletní struktura návrhu vrstev je ukázána v tabulce 4. Alespoň jedna extra vrstva, označená v tabulce jako propojovací vrstva, je nezbytná, aby uskutečnila vzájemné propojení vrstev. Nicméně by to znamenalo celkový počet 9 vrstev, ze kterých by při výrobě bylo 10 (ještě další hodnota). Kvůli tomuto důvodu jsou vrchní a spodní vrstvy DPS užívány jako propojovací vrstvy, což má výhodu, že hustota proudu v cestách je rozpuřlena. Cesty v těchto vrstvách jsou připojeny k cestám ve vnitřních vrstvách přes prokovené otvory a jsou „transportovány“ do výstupu primárního a sekundárního vinutí do dvou různých stran DPS. Podle způsobu spojení výstupu na sekundární a primární straně, můžou být získány 4 transformační poměry.

Celkové jmenovité tlouřtky DPS budou okolo 2,6 mm. To je příliš vysoké pro dovolené okno vinutí 1,8mm jádra E-PLT14. Pro E-E14 je okno vinutí vhodné, nicméně minimální okno vinutí tohoto jádra se sníženou výškou je lepřím řešením.

Tab. 5: Značky použití v textu

A_e	=	Ef. Plocha příčného řezu	N_{IC}	=	Vinutí pro IC napětí
$B_{\text{špička}}$	=	Špička mag. Indukce	P_{max}	=	Výstupní výkon
f	=	Četnost zapínání-vypínání	U_{imin}	=	Min. vstupní napětí
$I_P(\text{RMS})$	=	Primární ef. Proud	U_0	=	Výstupní napětí
$I_{\text{OUT}}(\text{RMS})$	=	Sekundární výstupní proud	U_{IC}	=	IC napětí
I_{mag}	=	Magnetizační proud	δ	=	Činitel využití
L_{PRIM}	=	Vlastní indukčnost prim. vinutí	δ_{prim}	=	Činitel využití prim. Signálu
I_e	=	Efektivní optická délka	δ_{sek}	=	Činitel využití sek. Signálu
G	=	Šířka vzduchové mezery	μ_a	=	Amplituda permeability
N_1	=	Závity prim. Vinutí	μ_e	=	Efektivní permeabilita
N_2	=	Závity sek. Vinutí	μ_0	=	Permeability prostředí

7 Závěr

Námětem práce bylo seznámení se s problematikou planárních a 3D cívek a transformátorů. Z různých technologií výroby vícevrstevných plošných spojů vybrat tu nejvhodnější a provést teroretický návrh planární cívky nebo transformátoru s vinutím na plošném spoji. Dále pak vybrat vhodné technologie, které budou ideální pro výrobu planárního transformátoru.

Pro výrobu plošného spoje byla vybrána klasická metoda, kdy na oboustrané desce jsou vyleptány vodivé cesty (vinutí). Pro spojení desek do vícevrstvého plošného spoje byly vybrány dvě technologie, a to metoda propojování pájením přes prokovené otvory a metoda pájení přes hranu. Výhody či nevýhody těchto metod se ukáží až při samotném sestavení konkrétního planárního transformátoru.

Z této práce vyplývá, že planární technologie jsou výhodné v několika ohledech. Jejich výroba je při dobře zvolených technologiích rychlá. Nemusí se navíjet žádná vinutí, což je zdoluhavé, ale stačí mít jednu šablonu, podle které se může vyrobit větší množství kusů. Dále je také důležitou vlastností jejich velikost, což vede k celkovému zmenšování výsledného výrobku, který například obsahuje planární transformátor namísto klasického.

8 Seznam použité literatury

- [1] Výroba elektronických zařízení: DPS materiály a technologie. Dostupné z WWW:
http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/VEZ/prednasky/kompozity_DPS.pdf
- [2] Design of Planar Power Transformers. Dostupné z WWW:
<http://www.ferroxcube.com/appl/info/plandesi.pdf>
- [3] Coil craft- Planar transformer ptotyping kit. Dostupné z WWW:
http://www.sagitron.es/data_sheet/coil0501.pdf
- [4] Philips Magnetic Products: 25 Watt DC/DC converter using integrated Planar Magnetics.
Dostupné na WWW:
<http://www.itee.uq.edu.au/~elec4400/datashts/ferrites/planconv.pdf>
- [5] Dokumenty od vedoucího práce Ing. Josefa Šandery, Ph.D.
- [6] STARÝ J., KAHLE P. *Plošné spoje a povrchová montáž*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 183 stran.